DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170451

张莉, 王婧, 逄焕成, 张珺穜, 郭建军, 董国豪, 丛萍. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170451
Zhang L, Wang J, Pang H C, Zhang J T, Guo J J, Dong G H, Cong P. Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170451

秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响*

张 莉[1], 王 婧[1], 逄焕成[1**], 张珺穜[1], 郭建军[2], 董国豪[2], 丛 萍[1]
(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 德州市农业科学研究院 德州 253000)

摘 要: 为明确秸秆颗粒还田在农业生产中推广应用的可行性, 在山东省冬小麦-夏玉米一年两熟种植区通过田间微区试验, 研究了秸秆不还田(CK)、常规粉碎还田(CCSI)和秸秆颗粒还田(GSI)对耕层土壤养分含量、冬小麦群体茎蘖数、旗叶净光合速率、叶绿素含量、干物质积累及分配和小麦产量的影响。结果表明: 与 CK 和 CCSI 处理相比, GSI 处理显著提高土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量; 增加基本苗和分蘖成穗率, 显著提高有效穗数 13.23%和 16.64%。同时, GSI 处理显著提高灌浆期叶面积指数、旗叶叶绿素含量和净光合速率, 改善开花后旗叶光合性能, 促进地上部干物质积累及其向籽粒的转运。与 CK 和 CCSI 处理相比, GSI 处理的开花后干物质向籽粒的转运量显著提高 19.65%和 14.75%, 籽粒产量显著提高 9.69%和 10.71%。相关分析表明, 穗粒数和千粒重对产量影响不显著, 有效穗数的提高是秸秆颗粒还田增产的主要原因。因此, 秸秆颗粒还田可作为一种安全有效的还田方式, 可在农业生产中推广应用。

关键词: 秸秆颗粒还田; 土壤养分; 冬小麦; 茎蘖数; 干物质积累; 产量
中图分类号: S365; S512.1 **文献标识码:** A

Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat*

ZHANG Li[1], WANG Jing[1], PANG Huangcheng[1**], ZHANG Juntong[1], GUO Jianjun[2], DONG Guohao[2], CONG Ping[1]
(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Science of Dezhou, Dezhou 253000, Shandong, China)

Abstract: To clarify the feasibility of incorporation of granulated straw into soil in Huang-Huai-Hai region, a micro-plot field experiment was conducted in winter wheat/summer maize rotation cropping system at Dezhou Agricultural Research Academy of Shandong Province. The effects of granulated straw incorporation on soil nutrients contents, wheat growth and yield components were investigated. A total of three treatments were included in the experiment — no straw incorporation (CK), conventional chopped straw incorporation into the 0–15 cm soil layer (CCSI) and granulated straw incorporation into the 0–15 cm soil layer (GSI). All the treatments were arranged in a completely randomized design with three replicates. The indexes determined during the winter wheat season included wheat tiller number, chlorophyll content and net photosynthetic rate of flag leaf, dry matter accumulation and its contribution to yield, and soil nutrients contents, and wheat yield after harvest. The results showed that compared with CK, CCSI and GSI treatments had significantly higher soil nutrients contents. The contents of soil organic matter, available nitrogen and available phosphorus under GSI treatment were higher than those under CCSI treatment by 8.54%, 6.12% and 6.25%, respectively. GSI treatment also improved seedling emergence and increased tiller number. The number of basic seedlings under GSI treatment increased by 1.63% and 19.39%, tiller number increased by 3.16%–13.23% and 11.28%–16.64%, fertile tillers rate increased by 9.88% and 4.92%, and spike number increased by 13.23% and 16.64% over those of CK and CCSI treatments, respectively. Meanwhile, GSI treatment delayed leaf senescence and increased leaf area index at filling stage by 21.79% and 16.97%, increased chlorophyll content by 7.56%–47.24% and 0.53%–12.88%, increased net photosynthetic rate of flag leaf at grain-filling stage by 15.76% and 3.33% respectively over those of CK and CCSI treatments. Improvement in leaf photosynthetic characteristics contributed to the

* 公益性行业(农业)科研专项项目(201303130)、国家自然科学青年基金项目(41501314)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IARRP-2014-12)资助
**通讯作者: 逄焕成, 研究方向为盐碱地改良与耕作制度研究。E-mail: panghuancheng@caas.cn
张莉, 研究方向为土壤耕作与培肥。E-mail: dazhang0376@163.com
收稿日期: 2017-05-14 接受日期: 2017-07-24
* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303100), the National Natural Science Foundation of China (41501314), and the Special Fund for Basal Research of Research Institutes in the Federal-Level Public Interest of China (IARRP-2014-12).
**Corresponding author, E-mail: panghuancheng@caas.cn
Received May 14, 2017; accepted Jul. 24, 2017

increase in aboveground dry matter production and translocation from vegetative organs to grain. Compared with CK and CCSI treatments, GSI treatment increased aboveground biomass at flowering stage by 17.09% and 6.33%, aboveground biomass at maturity stage by 9.85% and 18.91%, translocation of accumulated dry matter after flowering stage to grain-filling stage by 19.65% and 14.75%, respectively. Finally, GSI treatment had the highest grain yield, which was 9.69% and 10.71% higher than those under CK and CCSI treatments. Further analysis showed that grain yield had no significant correlation with kernel number per spike and thousand-kernel weight, but it had significant positive correlation with effective spike number. This indicated that spike amount was the main reason for the grain yield increasing. Therefore, the granulated straw incorporation was an effective option for straw return to the soil in agricultural production in Huang-Huai-Hairegion.

Keywords: Granulated straw incorporation; Soil nutrient content; Winter wheat; Tiller number; Dry matter accumulation; Grain yield

秸秆是农业生产中重要的副产品。据统计，我国农作物秸秆年产量达8.4亿t[1]。近年来，随着农业生产水平的提高和农民生活方式的转变，大量秸秆被随意堆弃或就地焚烧，造成资源浪费和环境污染[2-3]。秸秆还田可以增加土壤有机质含量，改善土壤结构，提高土壤含水量和微生物活性，促进作物增产[4-6]，是秸秆资源高效利用的主要途径，更是实现耕地用养结合的重要措施。但是生产中大量秸秆直接粉碎覆盖还田或浅耕还田，常影响秸秆腐解、后茬作物播种和出苗，导致出苗率低、生根困难和减产[7-9]，大大降低了农民秸秆还田的积极性，使得每年秸秆还田量仅占总量的20%左右[2]。秸秆“用则利，弃则害”[1]。前人研究表明，秸秆自身性质和外部形态能够影响秸秆腐解速率和作物产量[10-11]。缩短秸秆长度或增加秸秆与土壤的混合程度可显著提高秸秆分解速率[10]，降低土壤容重，增强土壤持水能力[12]，提高水分利用效率[13]。为了解决大量秸秆季节集中还田产生的负面问题，王婧等[14]提出秸秆颗粒化还田的新型秸秆还田方式，将质地轻、结构蓬松的秸秆转变为密度大、体积小的固体颗粒施入土壤。秸秆颗粒还田不仅能提高土壤消纳秸秆数量，改善还田性能，提高秸秆腐解速率，利于快速培肥地力，还能增加深层土壤含水量，优化作物生长环境[14-16]。但是目前关于秸秆颗粒还田的相关研究仍较少，针对秸秆颗粒还田对土壤肥力状况和作物生长发育的影响尚不清楚。

黄淮海地区是我国小麦的主产区，小麦(*Triticum aestivum*)产量占我国总产量的56%[17]。近年来，夏玉米(*Zea mays*)收获后大量秸秆直接粉碎旋耕还田常造成缺苗断垅、麦苗素质差和群体数量不足等问题[7-8]，亟需寻求更为有效的秸秆还田方式。鉴于此，本文在山东省冬小麦-夏玉米一年两熟种植区，通过田间微区试验，研究秸秆颗粒还田对土壤养分含量和冬小麦产量形成的影响，旨在优化秸秆还田方式，为黄淮海地区秸秆安全还田提供理论依据和技术手段。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2013—2014 年在山东省德州市德城区黄河涯镇的德州市农业科学研究院试验园区(116°18′E、37°27′N)进行。该地区是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟种植区，属于暖温带大陆性季风气候。年均气温 13.4 ℃，≥10 ℃的年均积温 4 621 ℃，无霜期 205 d，年降雨量 510 mm，主要集中在 7—9 月。试验期间的日平均降雨量和日平均气温见图 1。供试土壤为黄潮土，肥力均匀，试验前 0~20 cm 土层土壤基础理化性质为: pH 7.76，有机质 12.96 g·kg^{-1}，全氮 0.78 g·kg^{-1}，碱解氮 40.65 mg·kg^{-1}，有效磷 3.68 mg·kg^{-1}，速效钾 128.38 mg·kg^{-1}。

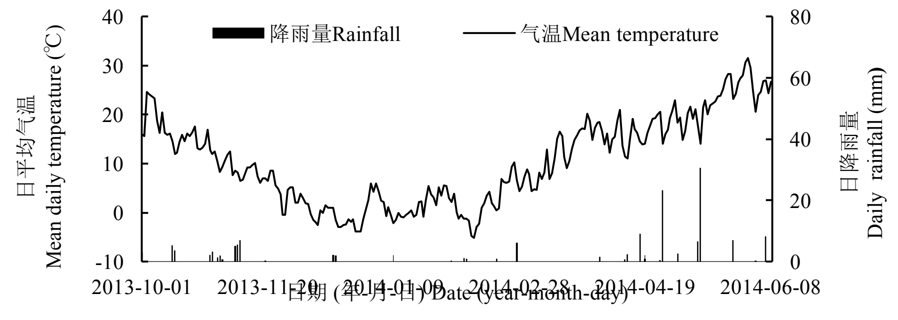


图 1 试验期间试验区日平均降雨量和日平均气温

Fig. 1 Daily rainfall and mean air temperature during the trial period in the study area

1.2　试验材料

供试秸秆采集于 2013 年夏玉米(‘郑单 958’)收获后的地上部分，自然风干后，一部分用 9CFZ-680 型粉碎机粉碎至 6~10 cm，贮存于干燥室作为粉碎秸秆；另一部分风干秸秆首先用 HC-2000 型粉碎机研磨过 2 mm 筛，随后添加 30%~35%的蒸馏水搅拌均匀，经过 FTHBCX 350 型饲料颗粒机常温挤压，制得直径 4 mm、长度为 4~6 cm 的棒状圆柱体，冷却风干后存放于干燥室作为秸秆颗粒。粉碎秸秆和秸秆颗粒的堆积密度分别为 26.44 $kg\cdot m^{-3}$ 和 242.93 $kg\cdot m^{-3}$。

1.3　试验设计

试验设秸秆不还田(CK)、常规粉碎还田(CCSI)和秸秆颗粒还田(GSI)共 3 个处理，每个处理 3 次重复，采用完全随机设计。微区于 2013 年 10 月 5 日开始修建，前茬玉米收获后，清除地上所有秸秆和根茬，每个微区四周挖深 40 cm、宽 10 cm 的沟槽，放置 300 cm·6 cm·55 cm (长·宽·高)的水泥板，其内侧铺设两层塑料薄膜，“U”钉固定在水泥板上，小区间隔 50cm，防止小区间相互影响，微区面积 9 m^2(3 m×3 m)。常规粉碎还田处理(CCSI)和秸秆颗粒还田处理(GSI)分别均匀撒施 6 $t\cdot hm^{-2}$ 已制备的粉碎秸秆和秸秆颗粒，然后每个小区均匀撒施等量基肥，纯 N、P_2O_5、K_2O 分别为 105 $kg\cdot hm^{-2}$、120 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 105 $kg\cdot hm^{-2}$；秸秆不还田处理(CK)的小区只施化肥，最后人工用铁锨混匀各小区 0~15 cm 土层土壤，耙平地表，灌水 750 $m^3\cdot hm^{-2}$。供试小麦品种为‘济麦 22’。于 2013 年 11 月 7 日人工点播，行距 20 cm，播量 225 $kg\cdot hm^{-2}$。拔节期追施纯 N 69 $kg\cdot hm^{-2}$，灌水 750 $m^3\cdot hm^{-2}$。其他管理措施同当地常规种植。

1.4　测定指标与方法

1.4.1　土壤养分含量

于冬小麦成熟期，按照对角线法用不锈钢土钻采取 0~20 cm 土层的土样，剔除可见的掉落物和根系后，风干过筛，进行土壤理化分析。土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定，全氮采用半微量凯氏法测定，碱解氮采用扩散法测定，有效磷采用钼锑抗比色法，速效钾采用火焰光度计法[18]。

1.4.2　群体茎蘖数

于冬小麦苗期、冬前期、起身期、拔节期、开花期和成熟期，定点测定 1 m 双行的基本苗和分蘖数，每个处理 3 次重复，并计算分蘖成穗率，公式如下：分蘖成穗率=成熟期群体茎蘖数/起身期群体茎蘖数×100。

1.4.3　叶面积指数

于冬小麦开花期和灌浆期(花后 21 d)选取同天抽穗的 30 个单茎，采用称重法测定旗叶叶面积和单茎叶面积，根据群体茎蘖数计算叶面积指数。

1.4.4　旗叶叶绿素含量

于冬小麦抽穗期每个处理挂牌标记长势一致的 90 支单茎，开花后每 7 d 选取 9 株标记植株，用 SPAD-502 叶绿素仪测定旗叶叶绿素含量，每片叶测定 3 次，取平均值。

1.4.5　旗叶净光合速率

于开花期和灌浆期(花后 21)上午 9:00—11:00，用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 便携式光合仪，用光合有效辐射为 1 200 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 的人工光源测定旗叶净光合速率。

1.4.6　干物质积累和转运

于开花期和成熟期分别选取同日抽穗的 30 个单茎，分为籽粒和其他两个部分，于 105 ℃杀青 15 min，75 ℃烘干至恒重，记录籽粒和地上干物质重量，并按照段文学等[19]公式计算干物质积累和转运的规律。

1.4.7　小麦测产

成熟期各小区随机选定 1 m 双行记录有效穗数；从中连续取 30 穗，测定千粒重和穗粒数。各小区人工收获，脱粒风干，记录产量和籽粒含水量，并按照公式计算产量：实际产量($kg\cdot hm^{-2}$)=实收产量($kg\cdot hm^{-2}$)×(1−籽粒含水量)/(1−13%)/收获面积(hm^2)×10^4 折合为实际产量。

1.5　数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 23.0 软件进行方差分析，用 LSD 法进行多重比较(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　秸秆颗粒还田对土壤养分含量的影响

由表 1 可知，与 CK 相比，CCSI 处理显著提高耕层土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量。而 GSI 处理比 CCSI 处理土壤有机质、碱解氮和有效磷含量又分别显著提高 8.54%、6.12%和 6.25%，其全氮和速效钾含量与 CCSI 处理无显著差异，表明秸秆颗粒还田可在一定程度上改善土壤养分状况。

表 1　不同处理冬小麦成熟期 0~20 cm 土层土壤养分的含量

Table 1　Soil nutrients contents in the 0–20 cm layer at maturity stage of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	有机质 Soil organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	碱解氮 Available N (mg·kg^{-1})	有效磷 Available P (mg·kg^{-1})	速效钾 Available K (mg·kg^{-1})
CK	12.08±0.06c	0.73±0.02b	25.84±0.97c	5.65±0.24c	138.2±1.8b
CCSI	12.34±0.09b	0.84±0.03a	30.63±0.78b	6.88±0.23b	150.9±3.9a
GSI	13.39±0.15a	0.86±0.03a	32.50±1.51a	7.31±0.17a	156.1±2.9a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at P < 0.05 levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.2　秸秆颗粒还田对冬小麦群体茎蘖数的影响

由表 2 可知，冬小麦群体茎蘖数随着生育进程推进呈增加趋势，在起身期达到峰值，随后逐渐下降。在各生育时期，处理间群体茎蘖数均表现为 GSI>CK>CCSI。在生育前期(苗期、冬前期和起身期)GSI 处理茎蘖数比 CCSI 处理分别显著提高 19.39%、12.79%和 11.28%；比 CK 分别提高 1.63%、4.06%和 3.16%，但无显著差异。在生育中后期(拔节期、开花期和成熟期)，GSI 的茎蘖数显著高于 CK 和 CCSI。与 CK 和 CCSI 处理相比，GSI 处理成熟期分蘖成穗数显著提高 13.23%和 16.64%，其分蘖成穗率提高 9.88%和 4.92%。表明秸秆颗粒还田利于小麦出苗和分蘖，提高成熟期分蘖成穗数，进而构建较高的群体数量。

表 2　不同处理冬小麦群体茎蘖数及分蘖成穗率

Table 2　Tiller numbers and fertile tillers rates at different growth stages of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	生育时期 Growth stage						分蘖成穗率 Fertile tillers rate (%)
	苗期 Seedling	冬前期 Pre-wintering	起身期 Initial jointing	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	成熟期 Maturity	
CK	260.7±6.1a	467.4±4.2a	1094.6±23.6a	890.0±8.7b	546.3±7.6b	515.1±7.6b	47.1±0.7b
CCSI	221.9±8.3b	431.2±8.3b	1014.7±14.0b	845.5±4.9c	529.1±5.2c	500.0±2.9b	49.3±0.9ab
GSI	264.9±3.9a	486.3±4.2a	1129.2±36.3a	949.7±12.3a	591.7±4.4a	583.2±4.4a	51.7±1.7a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at P < 0.05 levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.3　秸秆颗粒还田对冬小麦叶面积指数的影响

由表 3 可知，在开花期和灌浆期各处理旗叶叶面积无显著差异；而 GSI 处理开花期和灌浆期单茎绿色叶面积比 CK 显著提高 6.27%和 8.66%, CCSI 处理比 CK 显著提高 8.21%和 9.72%。各处理叶面积指数表现为 GSI>CCSI>CK。与 CCSI 处理相比，GSI 处理开花期和灌浆期的叶面积指数提高 8.31%和 16.97%，且差异显著，表明秸秆颗粒还田可提高冬小麦群体叶面积，利于截获更多的光能。

表 3　不同处理冬小麦绿色叶面积和叶面积指数

Table 3　Green leaf area and leaf area index at flowering and filling stages of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	开花期 Flowering stage			灌浆期 Filling stage		
	旗叶绿色叶面积 Area of green flag leaf (cm^2)	单茎绿色叶面积 Area of green leaves per culm (cm^2)	叶面积指数 Leaf area index (LAI)	旗叶绿色叶面积 Area of green flag leaf (cm^2)	单茎绿色叶面积 Area of green leaves per culm (cm^2)	叶面积指数 Leaf area index (LAI)
CK	12.16±0.27a	80.7±0.7b	4.41±0.08c	9.02±0.15a	39.4±1.2b	2.06±0.06b
CCSI	12.32±0.07a	88.6±0.6a	4.69±0.04b	9.46±0.16a	42.6±5.6a	2.15±0.02b
GSI	12.21±0.06a	85.8±0.8a	5.08±0.06a	9.44±0.41a	42.8±8.0a	2.51±0.08a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at P < 0.05 levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.4　秸秆颗粒还田对冬小麦旗叶叶绿素含量的影响

由图 2 可知，从开花期到开花后 28 d，各处理冬小麦旗叶 SPAD 值逐渐降低。在开花期和开花后 7 d, GSI

处理和 CCSI 处理的 SPAD 值均高于 CK，但 3 个处理间无显著差异。在开花后 14 d 和 21 d，GSI 处理旗叶 SPAD 值比 CK 显著提高 9.41%和 38.08%，比 CCSI 处理提高 0.53%和 3.05%，两者无显著差异。在开花后 28 d，GSI 处理比 CK 和 CCSI 处理显著提高 47.24%和 12.88%，表明秸秆还田可延缓叶绿素含量下降，且秸秆颗粒还田的延缓作用优于常规粉碎还田。

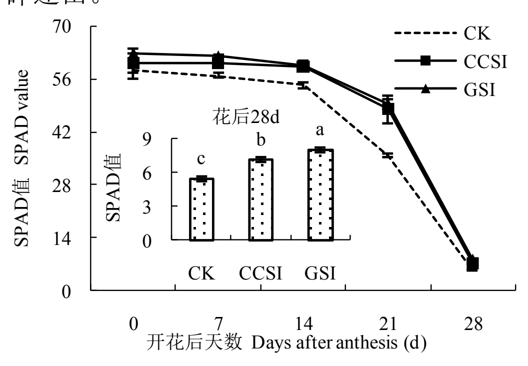


图 2 不同处理冬小麦旗叶叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll contents of flag leaf of winter wheat under different treatments

不同小写字母表示不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。CK：秸秆不还田；CCSI：常规粉碎还田；GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ levels among treatments. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.5 秸秆颗粒还田对冬小麦旗叶光合特性的影响

由图 3 可知，GSI 处理开花期旗叶净光合速率比 CK 显著提高 2.76%，比 CCSI 处理提高 1.18%，但两者无显著差异；而 GSI 处理灌浆期旗叶净光合速率显著高于其他处理，分别比 CK 和 CCSI 处理提高了 15.76%和 3.33%，表明秸秆颗粒还田能够维持小麦生育后期旗叶较强的光能转化能力。

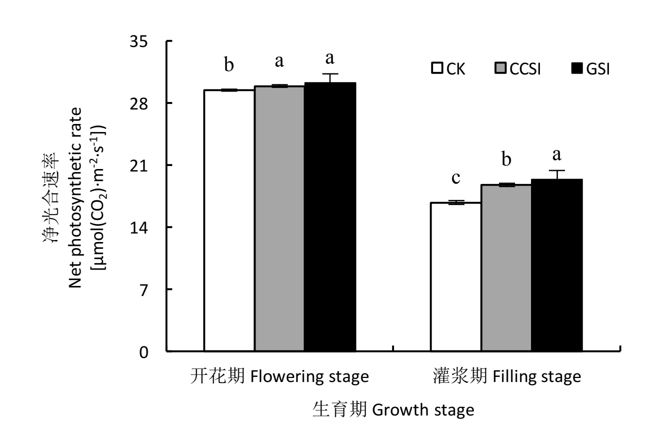


图 3 不同处理冬小麦开花期和灌浆期旗叶净光合速率

Fig. 3 Net photosynthetic rates of flag leaf of winter wheat at flowering and filling stages under different treatments

不同小写字母表示不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。CK：秸秆不还田；CCSI：常规粉碎还田；GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ levels among treatments. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.6 秸秆颗粒还田对干物质积累和转运的影响

由表 4 可知，与 CK 相比，GSI 处理和 CCSI 处理可显著提高开花期和灌浆期单茎干重和群体干重。与 CCSI 处理相比，GSI 处理开花期和成熟期单茎干重显著降低 4.91%和 5.83%，其开花期和成熟期群体干重显著提高了 6.33%和 9.85%，表明秸秆颗粒还田更利于提高冬小麦群体生物量。

表 4 不同处理冬小麦开花期和成熟期地上干物质积累量

Table 4 Aboveground dry matter accumulation at flowering and maturity stages under different treatments

处理	开花期 Flowering stage		成熟期 Maturity stage	
Treatment	单茎干重	群体干重	单茎干重	群体干重

	Dry weight per culm (g)	Dry weight of population ($t·hm^{-2}$)	Dry weight per culm (g)	Dry weight of population ($t·hm^{-2}$)
CK	1.37w0.05c	7.50w0.19c	2.14w0.05c	11.03eight
CCSI	1.56±0.02a	8.26±.266b	2.39±0.06a	11.94e0.69b
GSI	1.4840.01b	8.784eight	2.2540.02b	13.11e0.69a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at $P < 0.05$ levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

由表 5 可知, GSI 处理和 CCSI 处理的开花前同化物向籽粒的转运量、转运率及其对籽粒的贡献率均低于 CK, 且 GSI 处理开花前同化物向籽粒的转运率及其对籽粒的贡献率降低更加明显, 分别与 CCSI 处理降低 2.32%和 8.64%。开花后干物质转运量及其对籽粒的贡献率表现为 GSI>CCSI>CK, 其中 GSI 处理开花后向籽粒的转运量比 CCSI 处理显著提高 14.75%, 其花后干物质对籽粒贡献率比 CCSI 处理提高了 3.76%, 但差异不显著, 表明秸秆颗粒还田可以优化光合同化物分配, 利于光合产物向籽粒转运。

表 5　不同处理冬小麦花后干物质积累和转运

Table 5　Dry matter accumulation and distribution after flowering stage of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	开花前营养器官贮藏的同化物 Dry matter accumulated in vegetative organs before flowering stage			开花后积累的干物质 Dry matter accumulated after flowering stage	
	向籽粒转运量 Translocation amount to grain ($t·hm^{-2}$)	转运率 Translocation ratio (%)	对籽粒的贡献率 Contribution to grains (%)	向籽粒转运量 Translocation amount to grain ($t·hm^{-2}$)	对籽粒的贡献率 Contribution to grains (%)
CK	1.76±6.14a	23.43±1.00a	33.44±2.05a	3.53±3052b	66.71±2.05b
CCSI	1.60±.603a	19.41±1.70b	30.34±2.72ab	3.68±8717b	69.66±2.72ab
GSI	1.67±0.18a	18.96±2.02b	28.27±2.43b	4.22±0.05a	72.28±2.43a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at $P < 0.05$ levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

2.7　秸秆颗粒还田对冬小麦产量及其构成因素的影响

由表 6 可知, GSI 处理显著提高冬小麦产量, 分别比 CK 和 CCSI 处理提高 9.69%和 10.71%。从产量构成因素看, GSI 处理显著提高有效穗数, 分别比 CK 和 CCSI 处理提高 13.23%和 16.64%。GSI 处理的千粒重比 CK 显著提高 2.35%, 比 CCSI 处理提高 0.71%, 差异不显著。GSI 处理的穗粒数低于 CK 和 CCSI 处理, 但 3 个处理无显著差异。

相关分析表明, 小麦产量与有效穗数呈极显著正相关(R=0.832, P<0.01), 与穗粒数(R=0.331, P>0.05)和千粒重(R=0.125, P>0.05)无显著影响, 说明秸秆颗粒还田对冬小麦分蘖成穗影响较大, 有效穗数的大幅提高是增产的主要原因。

表 6　不同处理冬小麦产量及其构成因素

Table 6　Grain yield and yield components of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	有效穗数 Number of fertile spikes ($\times 10^4·hm^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	实际产量 Grain yield ($t·hm^{-2}$)
CK	515.1yield	29.51yiel	47.14yield	5.41±0.20b
CCSI	500.00.20b	29.700.20	47.900.20b	5.36±0.04b
GSI	583.20.04b	29.020.04	48.240.04b	5.94±0.31a

同列具有不同小写字母的数字在 P<0.05 水平的差异显著。CK: 秸秆不还田; CCSI: 常规粉碎还田; GSI 秸秆颗粒还田。Different lowercase letters in a column indicate significant differences at $P < 0.05$ levels. CK: no straw incorporation; CCSI: conventional chopped straw incorporation; GSI: granulated straw incorporation.

3　讨论

3.1　秸秆颗粒还田对土壤养分的影响

本研究表明, GSI 处理和 CCSI 处理显著提高耕层土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾的含量,

且 GSI 处理增加幅度较大，这应与不同形态的秸秆在土壤中分解速率有关。王婧等[14]研究表明，秸秆颗粒的平均腐解速率比粉碎秸秆提高了 31.68%，其碳素、氮素和磷素释放速率分别是粉碎秸秆的 1.8 倍、2.5 倍和 1.8 倍，有利于土壤养分的快速增加。另外，秸秆颗粒在制作过程中，增加了粉碎程度，破坏了玉米秸秆的表皮组织，降低木质化栅栏组织的物理保护[20-21]，可增强土壤微生物对秸秆纤维物质的分解活动，促进秸秆难分解物质腐解转化为土壤中的养分[14]。此外，秸秆颗粒的快速分解能给土壤微生物提供较多的能源，增强土壤微生物活性[22]，并利于微生物的繁殖，增加微生物数量[23]，促进土壤中有机态养分转化为无机态，进而提高土壤速效养分的含量。

3.2 秸秆颗粒还田对冬小麦产量形成的影响

出苗质量是影响冬小麦群体数量的主要因素，在很大程度上影响作物生长和产量[24]。殷文等[25]研究表明，增加秸秆与土壤的接触程度可提高出苗率和幼苗整齐度，提高小麦产量。本研究中，GSI 处理的基本苗显著高于 CCSI 处理，与 CK 无明显差异；小麦生育后期 GSI 处理的群体茎蘖数显著高于 CK 和 CCSI 处理，这可能是因为秸秆颗粒密度大、体积小，还田后能与土壤均匀混合，有效避免大量秸秆堆积于表层土壤造成的缺苗断垅、扎根困难等问题[7-8,24]，保证种子正常发芽，提高了基本苗。另外，随着秸秆腐解，秸秆中养分逐渐释放到土壤，大大改善土壤肥力状况，促进幼苗生长，显著提高分蘖成穗率，进而成熟期表现出较多的有效穗数。而 CCSI 处理尽管土壤养分含量较高，促进分蘖成穗，但因播种质量差，基本苗不足，使得群体茎蘖数仍低于 CK。因此，秸秆颗粒还田可提升还田质量，保证小麦正常出苗的同时，促进小麦分蘖，提高分蘖成穗率，利于构建高水平的群体数量。

小麦籽粒中 70%~85%的碳水化合物来自开花后光合产物，因此，开花后叶片光合性能直接影响籽粒的充实程度，决定粒重[26]。前人研究表明，秸秆还田可提升作物生育中后期旗叶光合性能，提高作物产量[27-28]。本研究与前人研究结果一致，秸秆还田能够提高灌浆期旗叶叶绿素含量和净光合速率，显著提高地上干物质积累量，且 GSI 处理的净光合速率显著高于 CCSI 处理，这与土壤养分变化规律相似，说明土壤肥力状况的改善，能够延缓叶片衰老，提高灌浆期叶片光合性能，增强灌浆期叶片光能截获和转化的能力，使得 GSI 处理表现出较高的群体生物量。郑成岩等[29]研究表明，干物质积累是作物产量形成的基础，开花后光合同化物向籽粒的分配与转运量直接决定籽粒产量。本研究结果表明，GSI 处理可显著提高花后干物质向籽粒的转运量及其对籽粒的贡献率，增加粒重。究其原因，一方面可能是由于秸秆颗粒腐解较快，提高了当季肥效[14]，利于作物生长，增加了开花期地上部生物量，进而促进开花前光合同化产物向籽粒的转运量。另一方面可能是由于 GSI 处理改善了灌浆期旗叶光合特性，利于合成更多的碳水化合物，提高花后干物质向籽粒的转运量，增加籽粒重量。此外，本研究发现，GSI 处理和 CCSI 处理的穗粒数与 CK 无显著差异，这与韩宾等[24]研究结果不同，这可能与还田秸秆数量和还田方式有关。

大多研究表明，秸秆还田可显著提高成穗数、穗粒数和千粒重，增加作物产量[30-31]。但也有学者研究认为，秸秆还田对千粒重无显著影响，可显著提高有效穗数和穗粒数[6,24]。而刘义国等[4]研究认为秸秆还田对穗粒数无明显影响，千粒重和分蘖成穗数的大幅提高是小麦产量的主要原因。本研究表明，GSI处理显著提高冬小麦产量，而CCSI处理与CK无显著差异。相关分析发现，籽粒产量与有效穗数呈极显著正相关，而与穗粒数和千粒重无显著相关性，说明GSI处理主要通过改变种床质量，保证小麦出苗，并促进小麦分蘖，提高其分蘖成穗率，进而显著提高有效穗数和小麦产量。

综上可知，GSI 处理能够提升还田质量，有效解决 CCSI 处理造成的基本苗和分蘖成穗数不足的问题；还能改善土壤肥力状况，提高小麦灌浆期旗叶净光合速率、叶绿素含量和叶面积指数，促进花后干物质积累及其向籽粒的转运，进而显著提高籽粒产量，有效避免了秸秆不还田处理作物生长后期供肥不足而引起作物早衰的问题，但秸秆颗粒还田的增产效应是否因气候变化和耕作方式的改变而存在差异，有待进一步深入研究。

4 结论

与秸秆不还田和常规粉碎还田相比，秸秆颗粒还田能够维持较高的基本苗,成熟期分蘖成穗数分别提高 13.23%和 16.64%；同时改善了土壤肥力状况，提高了小麦开花后旗叶叶绿素含量和净光合速率，显著增加了开花期和成熟期地上干物质积累量及开花后干物质向籽粒的转运量，小麦产量分别提高 9.69%和 10.71%。因此，秸秆颗粒还田是一种安全高效的还田方式。

参考文献 References

[1] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211–217
Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, et al. Estimation of straw resources in China[J].Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 211–217
[2] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228–234
Fang F, Li X, Shi Z L, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J].Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 228–234
[3] 郑军, 史建民. 我国农作物秸秆资源化利用的特征和困境及出路——以山东为例[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(3): 354–358
Zheng J, Shi J M. Utilization of crop straw: Current situation, dilemma of micro-economics and ways out — Taking Shandong Province as example[J]. Research of Agricultural Modernization, 2012, 33(3): 354–358
[4] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131–135
Liu Y G, Liu Y H, Liu H J, et al. Effects of straw returning amount on soil physical and chemical properties and yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(3): 131–135
[5] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612–619
Zhang J, Wen X X, Liao Y C, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 612–619
[6] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 27–35
Yuan M M, Wu G, Hu R, et al. Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(1): 27–35
[7] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463–465
Li S K, Wang K R, Feng J K, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J].Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 463–465
[8] 贾春林, 郭洪海, 张勇, 等. 玉米秸秆全量还田下不同播种方式对土壤结构及小麦苗期生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 243–248
Jia C L, Guo H H, Zhang Y, et al. Effects of different seeding manner on the soil structure and wheat seedling growth under maize stalk full returned to the field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(8): 243–248
[9] 谢瑞芝, 李少昆, 金亚征, 等.中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 397–404
Xie R Z, Li S K, Jin Y Z, et al. The trends of crop yield responses to conservation tillage in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 397–404
[10] Cabiles D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout SE, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(2): 211–216
[11] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103–111
Yu K, Feng H, Zhao Y, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 103–111
[12] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224–228
Wang Z, Feng H. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 224–228
[13] 王增丽, 王珍, 冯浩. 秸秆粉碎氨化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 211–215
Wang Z L, Wang Z, Feng H. Effects of pulverized and ammoniated straw on soil bulk density and soil water-holding characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 211–215
[14] 王婧, 张莉, 逄焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177–183
Wang J, Zhang L, Pang H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 177–183
[15] 郑健, 王燕, 蔡焕杰, 等. 秸秆颗粒形态对沟灌入渗特征影响的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(1): 66–72
Zheng J, Wang Y, Cai H J, et al. Experimental investigation into effects of maize leaf and straw fragments on soil water infiltration characteristics in furrow irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(1): 66–72

[16] 邱立春, 孙跃龙, 王瑞丽, 等. 秸秆深还对土壤水分转移及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6): 84–91
Qiu L C, Sun Y L, Wang R L, et al. Influence of deep-buried maize stalks on soil moisture transfer and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 84–91
[17] 郭淑敏, 马帅, 陈印军. 我国粮食主产区粮食生产态势与发展对策研究[J]. 农业现代化研究, 2006, 27(1): 1–6
Guo S M, Ma S, Chen Y J. State and trend of grain product of main grain productive area and developing countermeasures in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2006, 27(1): 1–6
[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agro-chemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press of China, 2000
[19] 段文学, 于振文, 石玉, 等. 施氮深度对旱地小麦耗水特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 657–664
Duan W X, Yu Z W, Shi Y, et al. Effects of nitrogen application depth on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in rainfed wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(4): 657–664
[20] Angers D A, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size[J]. Plant and Soil, 1997, 189(2): 197–203
[21] Summerell B A, Burgess L W. Decomposition and chemical composition of cereal straw[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 551–559
[22] 周柳强, 黄美福, 罗文丽, 等. 粉碎和添加菌剂对红壤区自然堆沤条件下稻秆养分释放的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5200–5205
Zhou L Q, Huang M F, Luo W L, et al. Straw nutrient releasing regularity under commination and adding stem rot agent in red soil region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5200–5205
[23] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(1): 41–48
[24] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48–53
Han B, Li Z J, Wang Y, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 48–53
[25] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 河西灌区不同耕作与秸秆还田方式对春小麦出苗及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 180–187
Yin W, Chen G P, Chai Q, et al. Effect of tillage and straw retention mode on seedling emergence and yield of spring wheat in the Hexi Irrigation Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 180–187
[26] 陈雨海, 余松烈, 于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 730–734
Chen Y H, Yu S L, Yu Z W. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 730–734
[27] 吕美蓉, 宁堂原, 张涛, 等. 少免耕和秸秆还田对冬小麦光合特性的影响[J]. 山东农业科学, 2008, 40(6): 5–8
Lü M R, Ning T Y, Zhang T, et al. Effect analysis on photosynthetic characters of winter wheat under minimum or zero tillage system and straw returning[J]. Shandong Agricultura Sciences, 2008, 40(6): 5–8
[28] 刘义国, 林琪, 王月福, 等. 秸秆还田与氮肥耦合对冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 42–44
Liu Y G, Lin Q, Wang Y F, et al. Effects of coupling of straw-return and nitrogen fertilizer on photosynthetic characters and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 42–44
[29] 郑成岩, 于振文, 马兴华, 等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J]. 作物产量, 2008, 34(8): 1450–1458
Zheng C Y, Yu Z W, Ma X H, et al. Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1450–1458
[30] 逄焕成. 秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 174–175
Pang H C. The effect of crop waste cover on soil environment and winter wheat yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 174–175
[31] 赵四申, 张西群, 贾素梅, 等. 玉米秸秆整株还田对小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 145–147
Zhao S S, Zhang X Q, Jia S M, et al. Influence of returning whole corn stalk into soil on wheat growth and its yield[J]. Chinese

Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 145–147